

BEHAVIOUR OF MASONRY WALLS UNDER BLAST LOADS

Gabriel F. Aráoz and Bibiana M. Luccioni

*Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán and Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina,
garaoz@herrera.unt.edu.ar, bluccioni@herrera.unt.edu.ar, <http://www.herrera.unt.edu.ar/iest>*

Keywords: Masonry, Blast load, Damage.

Abstract. Iso-damage curves for the assessment of damage due to blast loads on structures can be found in the literature. These curves seem to be an attractive way to approximately relate pressures and impulses to damage produced in different types of buildings and parts of them. In general, they have been obtained from a wide compilation of data related to damage produced in masonry houses and other buildings and structural elements in both experimental and actual explosions. These curves can be alternatively obtained with modern computers codes. This presents an advantage in the possibility of changing geometry, support conditions and material properties. However, this procedure requires an appropriate calibration of the numerical tool and the material model to insure it is able to reproduce the behaviour under blast loads precisely.

The main objective of this paper is the numerical study of behaviour of masonry walls under different blast loads with variable support and geometric conditions. The results compared with experimental and analytical values contribute to the development of a useful tool for the assessment of damage in masonry elements and also other structural elements.

The influence of discretization level and constitutive model type in the masonry walls response is analyzed. Two different models are considered for the walls: a box type zoning and a fragment/brick zoning. The last one presents the possibility of defining different properties for mortar and bricks. On the other hand, the erosion technique is also studied. Failure modes for different explosive charges located at variable distance are presented. The results are compared with those found in open literature and, finally, the work is concluded with useful suggestions for numerical modeling of this kind of problem.

1 INTRODUCCION

Debido a distintos sucesos tanto accidentales como intencionales ocurridos alrededor del mundo, las cargas explosivas han recibido una importante atención en los últimos años. Desafortunadamente, los ataques recientes en el World Trade Center (2005) o en los subterráneos de Londres (2005) así como otros ataques en el mundo demuestran que la actividad terrorista se ha incrementado y la tendencia actual indica que será aun mayor en el futuro. Distintas agencias destinadas al manejo de emergencias proveen información e instrucciones relacionadas al diseño de edificios con el fin de mitigar los efectos de estos ataques (FEMA, 2003). En este sentido, los muros de mampostería exteriores están enormemente afectados por las sobrepresiones originadas a partir de la detonación de explosivos. Por otro lado, los escombros de la mampostería o el colapso de elementos estructurales y no estructurales pueden ser letales para la seguridad de las personas dentro del edificio. Existen en la bibliografía curvas de iso-daño para la determinación del daño en elementos estructurales y no estructurales. Dichas curvas han sido obtenidas a partir de explosiones tanto experimentales como reales, y resultan una forma atractiva para determinar el daño producido en edificios o partes de ellos a partir de valores de presión e impulso. Por otro lado, las mismas pueden obtenerse mediante la utilización de códigos computacionales con la ventaja de poder modificar la geometría, condiciones de borde o propiedades de los materiales involucrados en el problema. Con este propósito, el objetivo de este trabajo es el estudio numérico del comportamiento de muros de mampostería con distintos modelos a fin de calibrar una herramienta numérica que permita la determinación del daño tanto en la mampostería como en otros elementos estructurales.

2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS EXPLOSIVAS

2.1 Introducción

La palabra explosión se utiliza en sentido general para todas las reacciones químicas que pueden causar un sustancial aumento de presión en el espacio circundante. Una explosión puede tomar la forma de una deflagración que genera una presión moderada de velocidad del orden de m/seg o de una detonación que genera sobrepresiones muy altas en el espacio cercano con velocidades del orden de km/seg. La detonación es una forma de reacción del explosivo que produce ondas de choque de gran intensidad. La mayoría de los explosivos pueden ser detonados bajo un estímulo suficiente y como reacción, se generan gases a alta temperatura bajo presiones entre 100kbar y 300kbar con temperaturas entre 3000°C y 4000°C. Dichos gases se expanden violentamente, expulsando al aire circundante del volumen que ocupa, originando una onda de presión que se mueve hacia afuera desde el lugar de detonación a alta velocidad.

2.2 Onda de presión

Si el explosivo está rodeado de un medio como el aire, se genera una onda de presión caracterizada por un aumento repentino de la presión seguido de una caída exponencial, como se ilustra en la Figura 1. La fase negativa de la onda de presión es usualmente de mayor duración que la fase positiva, mientras que el valor pico de la presión negativa Δp_{min} es pequeño comparado con el pico de sobrepresión positiva.

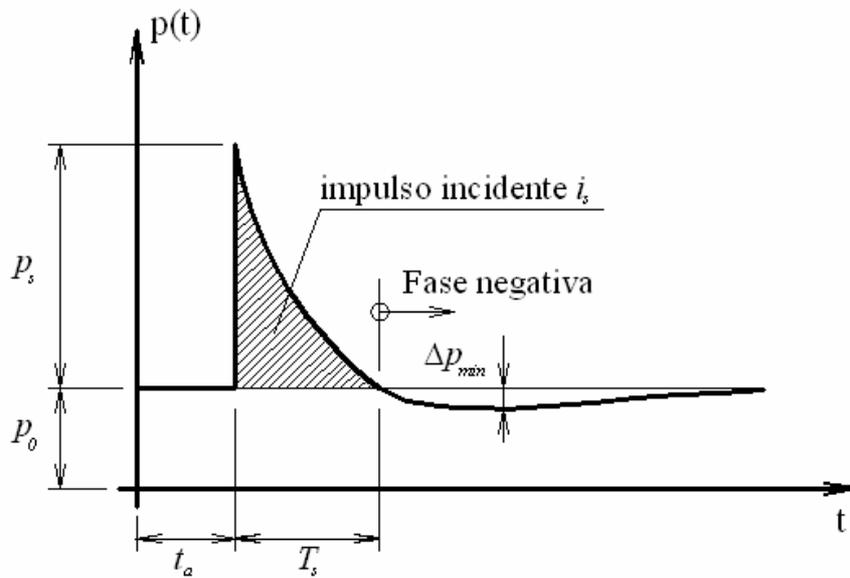


Figura 1: Onda de presión

Los valores de presión están dados por la siguiente expresión (Smith y Hetherington, 1994)

$$p(t) = p_0 + p_s \left(1 - \frac{t - t_a}{T_s} \right) e^{\left[-b(t - t_a) / T_s \right]} \quad (1)$$

donde t es el tiempo, p_0 es la presión ambiental (1,01325 bar), p_s es el pico de sobrepresión incidente, T_s es la duración de la fase positiva, t_a es el tiempo de llegada y b es una constante positiva llamada parámetro de forma de onda que depende del pico de sobrepresión.

2.3 Distancia escalada

La aproximación más utilizada para el escalamiento de la onda explosiva es la ley de Hopkinson (Baker et al, 1983), la cual establece que ondas explosivas similares son producidas por distancias escaladas idénticas cuando dos cargas diferentes del mismo explosivo y con la misma geometría son detonadas en la misma atmósfera. Por lo tanto, cualquier distancia R desde una carga explosiva W puede ser transformada en una distancia escalada característica Z ,

$$Z = R/W^{1/3} \quad (2)$$

donde W es la masa de la carga expresada en kilogramos de trinitrotolueno (TNT). El uso de Z permite una representación compacta y eficiente de las características de la onda explosiva para un gran rango de situaciones.

2.4 Parámetros del frente de onda

Existen varias soluciones para los parámetros del frente de onda, los cuales son presentados usualmente en gráficos, tablas o ecuaciones basadas en resultados experimentales o numéricos, como las tablas dadas por Kinney y Graham (1985) o las siguientes expresiones presentadas por Smith y Hetherington (1994):

Expresiones de Henrych:

$$\begin{aligned}
 p_s &= \frac{14.072}{Z} + \frac{5.540}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \text{ bar} & 0.05 \leq Z < 0.3 \\
 p_s &= \frac{6.194}{Z} - \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \text{ bar} & 0.3 \leq Z \leq 1 \\
 p_s &= \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \text{ bar} & 1 \leq Z \leq 10
 \end{aligned} \tag{3}$$

Expresiones de Brode:

$$\begin{aligned}
 p_s &= \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar} & p_s > 10 \text{ bar} \\
 p_s &= \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ bar} & 0.1 < p_s < 10 \text{ bar}
 \end{aligned} \tag{4}$$

La precisión de las mediciones en el campo cercano es más baja debido a la complejidad del fenómeno de explosión (Smith y Hetherington, 1994)

Cuando las ondas explosivas encuentran una pared de longitud infinita sobre la cual chocan con ángulo de incidencia nulo, éstas son normalmente reflejadas. Todo el flujo detrás de la onda se detiene y las presiones son considerablemente mayores que las incidentes.

El pico de presión reflejada p_r puede obtenerse a partir de la relación de Rankine Hugoniot para un gas ideal y resulta:

$$p_r = 2 p_s \left(\frac{7 p_0 + 4 p_s}{7 p_0 + p_s} \right) \tag{5}$$

El caso más usual de carga sobre superficies planas extensas está representado por ondas que golpean con incidencia oblicua. Para ángulos de incidencia entre 0° y 90° , aparece tanto reflexión regular como reflexión Mach según del ángulo de incidencia y la fuerza de choque (Baker et al, 1983; Smith y Hetherington, 1994). La evaluación de las presiones reflejadas resultantes de múltiples reflejos sobre superficies con diferentes ángulos de incidencia es muy complicada y difícil de realizar con ecuaciones empíricas. En este caso, el uso de métodos numéricos es más apropiado.

3 MODELACIÓN NUMÉRICA

3.1 Introducción

Se presenta en este punto la simulación numérica de la acción de cargas explosivas de distinta magnitud sobre muros de mampostería ubicados a distintas distancias de la explosión. Se utilizan cargas explosivas esféricas de 1 a 100 kg de TNT y el análisis se realiza mediante el programa AUTODYN (Century Dynamics Inc., 2005).

Todos los modelos computacionales analizados en esta sección están compuestos por un volumen de aire en donde se propaga la onda de presión y en el cual está inmerso el elemento estructural.

El análisis comienza con la modelación de la detonación y la propagación de la onda de presión dentro del explosivo y en el aire en contacto con el explosivo. Este análisis se ejecuta

en forma más detallada en una etapa previa en la cual se modela un explosivo esférico. Luego, los resultados de este primer análisis son mapeados al modelo tridimensional. A partir de este punto, se simula la propagación de la onda explosiva en el aire y su interacción con la pared.

3.2 Características generales del modelo

3.2.1 Modelación de la carga explosiva

La primera etapa en la simulación numérica se trata de la modelación bidimensional de la explosión. Para ello se consideran cargas esféricas de 1; 5; 10 y 100 kg de TNT inmersas en una esfera de aire de 1m de radio, como puede observarse en la Figura siguiente

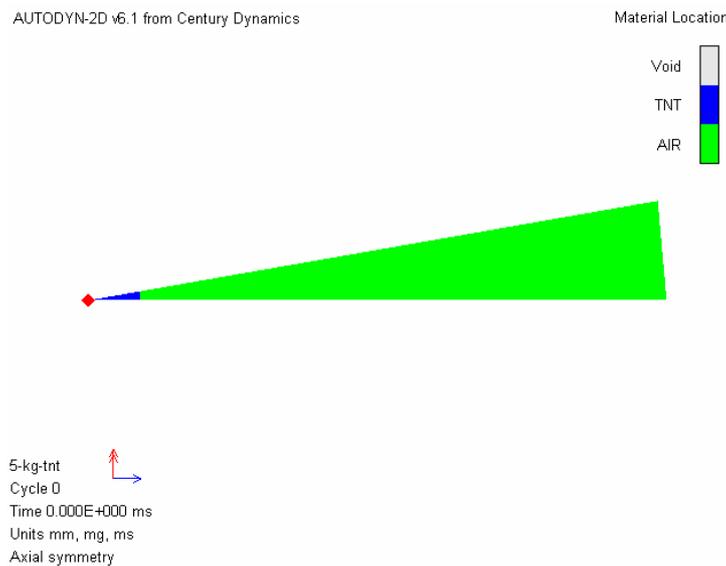


Figura 2: Detonación de 5 kg de TNT. Modelo 2D

Adoptando para el TNT una densidad de 1.63 g/cm^3 , los radios correspondientes a las distintas cargas se detallan en la siguiente tabla:

| Masa de explosivo (kg) | Radio de la esfera (mm) |
|------------------------|-------------------------|
| 100 | 245 |
| 10 | 114 |
| 5 | 90 |
| 1 | 53 |

Tabla 1: Radios utilizados para las distintas cargas de TNT

Para representar la fase de detonación de una explosión con un grado de precisión aceptable es recomendable tener por lo menos 10 celdas dentro de la carga de explosivo. En los casos de 100, 10 y 5kg se considera una subgrilla de 100 elementos mientras que para 1kg se consideran 200 elementos a lo largo del radio.

3.2.2 Modelo 3D

En la Figura 3 se muestra el modelo 3D utilizado. La carga explosiva se ubica siempre en el centro de la sección, a distintas distancias del muro de mampostería. Las dimensiones del

volumen de aire son 3040mm de ancho, 3040mm de altura y 5000mm de largo. A su vez, se consideran en el mismo 2 discretizaciones o mallas:

Fina: $dx = dy = 4 \text{ mm}$, $dz = 5 \text{ mm}$
 Gruesa: $dx = dy = 8 \text{ mm}$, $dz = 10 \text{ mm}$

Para modelar el aire se usa una subgrilla tridimensional con procesador Euler FCT (Euler de orden mayor) (Century Dynamics Inc., 2005). El flujo del aire hacia fuera está permitido en todos los bordes excepto la cara inferior que corresponde al suelo en donde se supone que la onda de presión se refleja. En la parte inferior se modela un volumen adicional de 100mm de espesor que servirá como piso cuya finalidad será la de contener la eventual caída del muro o de sus partes. En todos los casos se tiene en cuenta el efecto de la aceleración de la gravedad $g=0.00981 \text{ mm/ms}^2$.

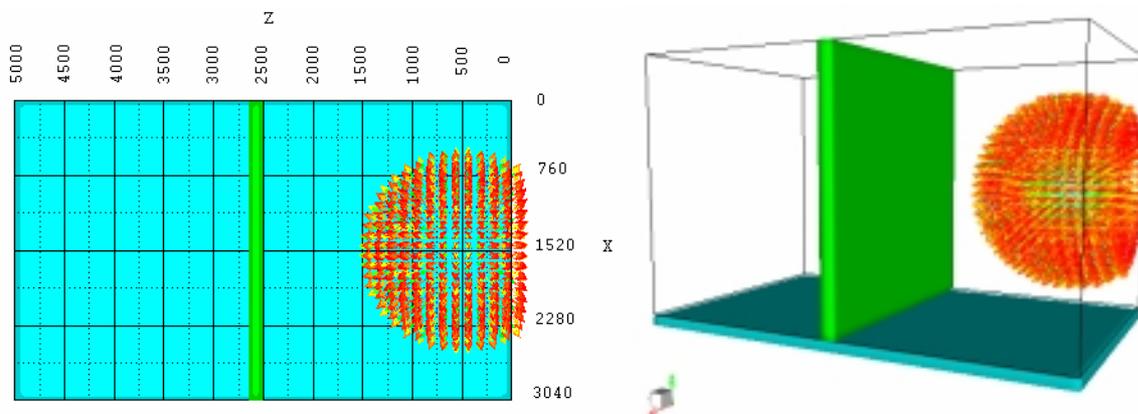


Figura 3: Vista superior y perspectiva del modelo 3D. Ubicación del muro y de la carga explosiva

El muro de mampostería tiene una sección de 3040 x 3040 mm, 150 mm de espesor y se encuentra empotrado en todos sus bordes. Está compuesto por ladrillos comunes y se modela con elementos sólidos tridimensionales que se resuelven con un procesador Lagrange. Para estudiar el comportamiento estructural de los muros, se analiza la propagación e interacción de la onda explosiva con los mismos. Para ello se utiliza un algoritmo de interacción entre los procesadores de Lagrange (muro) y Euler (aire).

Para la modelación del muro se consideran 2 tipos de zonificación:

- a) Placa homogénea (box)
- b) Muro fragmentado en ladrillos y mortero (fragment/brick)

El último caso presenta la posibilidad de adoptar diferentes propiedades para mortero y ladrillo. Además se considera para cada caso una discretización fina y otra gruesa en correspondencia con el mallado de aire utilizado.

Los niveles de discretización para el modelo homogéneo son los siguientes:

Fina: $dx = dy = 4 \text{ mm}$, $dz = 5 \text{ mm}$
 Gruesa: $dx = dy = 8 \text{ mm}$, $dz = 7.5 \text{ mm}$

Las características utilizadas en el modelo fragmentado son:

Nº de ladrillos en x: 10 $dx = 286 \text{ mm}$ Nº de divisiones: 2 (malla gruesa), 6 (malla fina)
 Nº de ladrillos en y: 34 $dy = 70 \text{ mm}$ Nº de divisiones: 1 (malla gruesa), 2 (malla fina)
 Nº de ladrillos en z: 1 $dz = 150 \text{ mm}$ Nº de divisiones: 2 (malla gruesa), 3 (malla fina)

El espesor del mortero es de 20 mm. Estas dimensiones fueron adoptadas a fin coincidir con las dimensiones generales del modelo homogéneo.

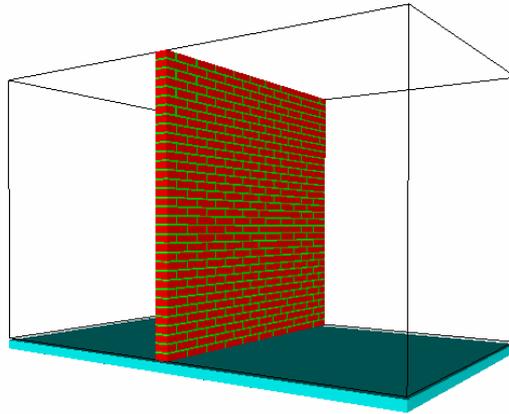


Figura 4: Modelo 3D del muro con zonificación fragmentada

3.2.3 Precisión en la propagación de la onda explosiva

Con el fin de determinar el grado de precisión del modelo, se realiza un estudio de la propagación de la onda de presión en el volumen de aire y se comparan los valores de presión incidentes y reflejadas obtenidas numéricamente para los distintos niveles de discretización con aquellos obtenidos a partir de expresiones analíticas. A tal efecto se modela un volumen de aire en el cual se permite el flujo hacia fuera en todas las caras del mismo. Los resultados se presentan en la Tabla 2 y las ondas de presión correspondientes se muestran en la Figura 4.

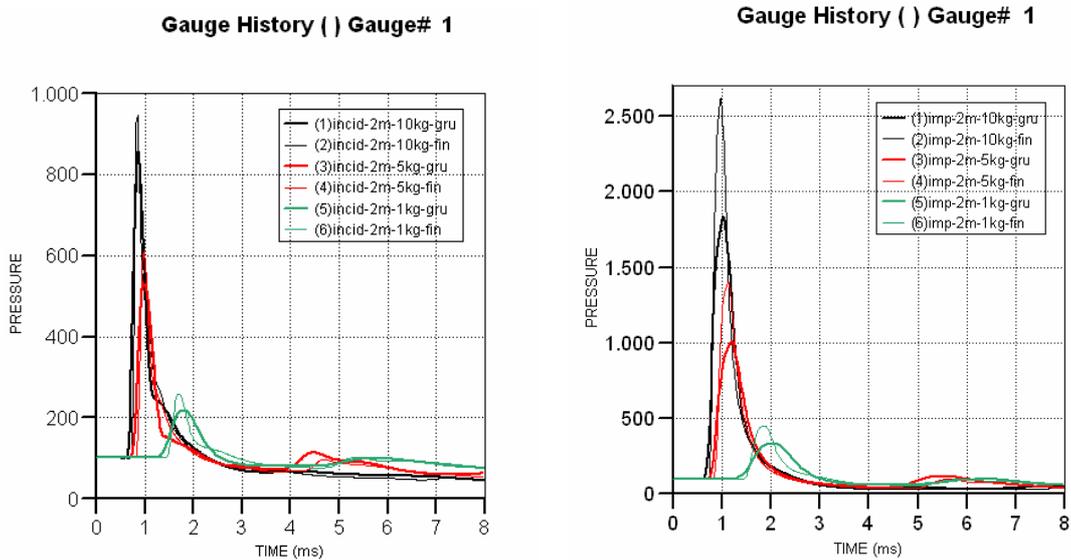


Figura 5: Ondas de presión incidentes y reflejadas para distintas cargas y niveles de discretización

| Modelo utilizado | | Presiones pico incidentes (KPa) | | | Presiones pico Reflejadas (KPa) | | |
|---------------------|-----------------|---------------------------------|--------|--------|---------------------------------|---------|--------|
| | | Masa de explosivo (kg TNT) | | | Masa de explosivo (kg TNT) | | |
| | | 10 | 5 | 1 | 10 | 5 | 1 |
| AUTODYN | Malla Fina | 947,07 | 610,38 | 258,42 | 2619,5 | 1399,6 | 451,91 |
| | Malla Gruesa | 854,76 | 534,12 | 217,39 | 1832,6 | 1004,4 | 332,87 |
| | Diferencias (%) | 9,75 | 12,49 | 15,88 | 30,04 | 28,24 | 26,34 |
| Valores analíticos* | Henrych | 997,22 | 659,48 | 276,78 | 4893,31 | 2692,46 | 660,99 |
| | Diferencias (%) | 5,03 | 7,45 | 6,63 | 46,47 | 48,02 | 31,63 |
| | Brode | 1101,33 | 654,77 | 257,68 | 5178,61 | 2663,67 | 583,47 |
| | Diferencias (%) | 14,01 | 6,78 | -0,29 | 49,42 | 47,46 | 22,55 |

* Los valores analíticos de presión reflejada se determinaron utilizando la Ec. 5 (Rankine Hugoniot)

Tabla 2: Presiones incidentes y reflejadas totales para distintas cargas explosivas a 2m de distancia

Las diferencias porcentuales se determinan con la siguiente expresión:

$$Diferencia(\%) = 100 \cdot \left(\frac{p_2 - p_1}{p_1} \right) \quad (6)$$

En el caso de los valores numéricos: p_2 es la presión obtenida con malla gruesa y p_1 la obtenida con malla fina. En los valores analíticos se comparan las presiones obtenidas según Henrych y Brode con la presión correspondiente a la malla fina.

En todos los casos el mallado fino presenta menores diferencias que el grueso. Se observa además que las diferencias respecto a los valores analíticos para presiones incidentes son mucho menores que para presiones reflejadas. Los tiempos en los cuales se producen los valores máximos prácticamente no varían con el grado de discretización. Lo dicho anteriormente coincide con las observaciones realizadas por Alia y Souli (2005) y Luccioni et al. (2006)

Distintos autores indican que la fase negativa de la onda sólo debe tenerse en cuenta cuando actúa sobre elementos de poca densidad. Sin embargo, al dejar actuar la fase negativa de la onda, se observa que el muro se desplaza hacia la ubicación de la carga explosiva. Dicho comportamiento contra-intuitivo se describirá más adelante en el punto 4.2.

El programa AUTODYN permite desactivar cualquier parte del modelo durante el proceso, con lo que se reduce considerablemente el tiempo de ejecución si sólo se tiene en cuenta el tiempo transcurrido hasta que el impulso originado por la explosión alcanza su valor máximo. Si se aplica este procedimiento no puede verse el efecto contra-intuitivo antes señalado.

3.2.4 Modelos constitutivos

Para modelar el aire se utiliza la ecuación de estado de gas ideal; mientras que para reproducir el comportamiento de la mampostería, ladrillos y mortero, se utilizan modelos elastoplásticos similares a los modelos elastoplásticos para hormigón. Los parámetros de cada material son obtenidos a partir de resultados experimentales (Rougier V.C., 2007). Los valores de presión media p y de tensión de fluencia Y se determinan con las siguientes expresiones:

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (7)$$

$$Y = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (8)$$

Las propiedades adoptadas para los distintos materiales se detallan en las siguientes tablas:

Ecuación de estado de gas ideal
 $\gamma = 1.4$
 Densidad de referencia: 1.225E-03 g/cm³
 Temperatura de referencia: 2.882E+02 °K
 Calor específico (C.V.) : 7.173E+02 J/kgK

Tabla 3: Propiedades del aire

| | | |
|---|--|----------------------------------|
| Ecuación de estado: Lineal Densidad de referencia: 1.600E+00 g/cm ³ Módulo volumétrico: 651319 kPa Modelo de resistencia: Drucker Prager (por tramos lineales) Módulo elástico transversal: 594683 kPa Criterio de falla: Tensión principal Tensión de falla: 480 kPa | Evolución de la tensión de fluencia con la presión media | |
| | Presión media p (kPa) | Tensión de fluencia Y (kPa) |
| | -160.00 | 0.00 |
| | 0.00 | 2250.00 |
| | 1320.00 | 3960.00 |

Tabla 4: Propiedades de la mampostería

| | | |
|---|--|----------------------------------|
| Ecuación de estado: Lineal Densidad de referencia: 1.840E+00 g/cm ³ Módulo volumétrico: 626190 kPa Modelo de resistencia: Drucker Prager (por tramos lineales) Módulo elástico transversal: 571739 kPa Criterio de falla: Tensión principal Tensión de falla: 780 kPa | Evolución de la tensión de fluencia con la presión media | |
| | Presión media p (kPa) | Tensión de fluencia Y (kPa) |
| | -260.00 | 0.00 |
| | 0.00 | 1892.00 |
| | 2762.00 | 8285.00 |

Tabla 5: Propiedades del ladrillo

| | | |
|--|--|----------------------------------|
| Ecuación de estado: Lineal | Evolución de la tensión de fluencia con la presión media | |
| Densidad de referencia: 1.900E+00 g/cm ³ | | |
| Módulo volumétrico: 777778 kPa | | |
| Modelo de resistencia: Drucker Prager (por tramos lineales) | | |
| Módulo elástico transversal: 583333 kPa | | |
| Criterio de falla: Tensión principal | | |
| Tensión de falla: 534 kPa | | |
| | Presión media p (kPa) | Tensión de fluencia Y (kPa) |
| | -178.00 | 0.00 |
| | 0.00 | 1600.00 |
| | 1333.00 | 3960.00 |

Tabla 6: Propiedades del mortero

3.3 Casos analizados

3.3.1 Muros con mallado y tipo de zonificación diferentes

En este punto se analizan los modelos con zonificación homogénea (box) y fragmentada (brick) desarrollados a su vez con dos niveles de discretización diferentes. El volumen de aire se desactiva para un tiempo de 5ms, es decir que sólo se tiene en cuenta el impulso positivo. En las figuras siguientes pueden observarse los modelos para 2m de distancia y 10 kg de TNT cuando se alcanzan los 100ms.

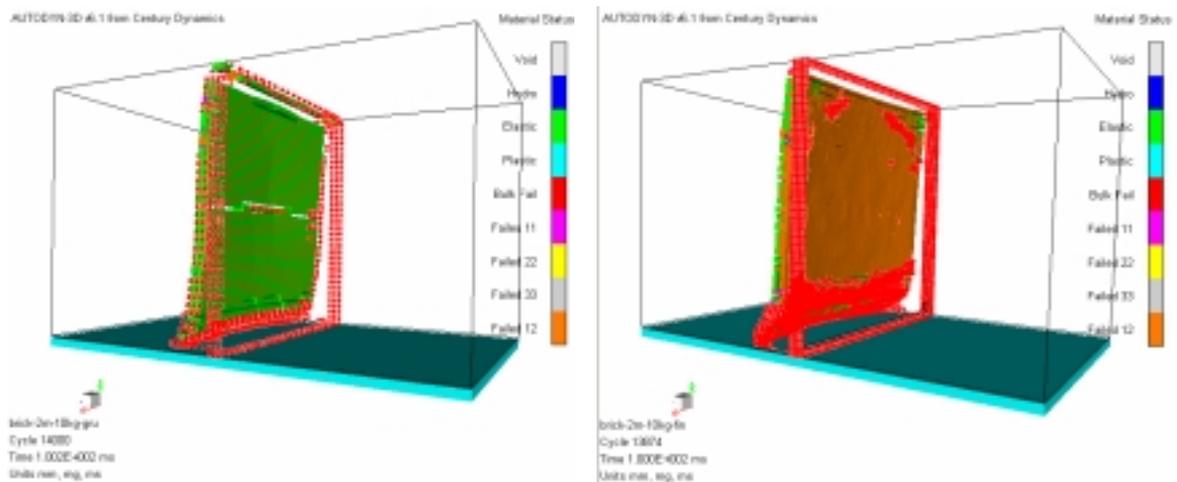


Figura 6: Perspectivas de modelos fragmentados para 10 kg de TNT a 2m de distancia con malla gruesa y fina

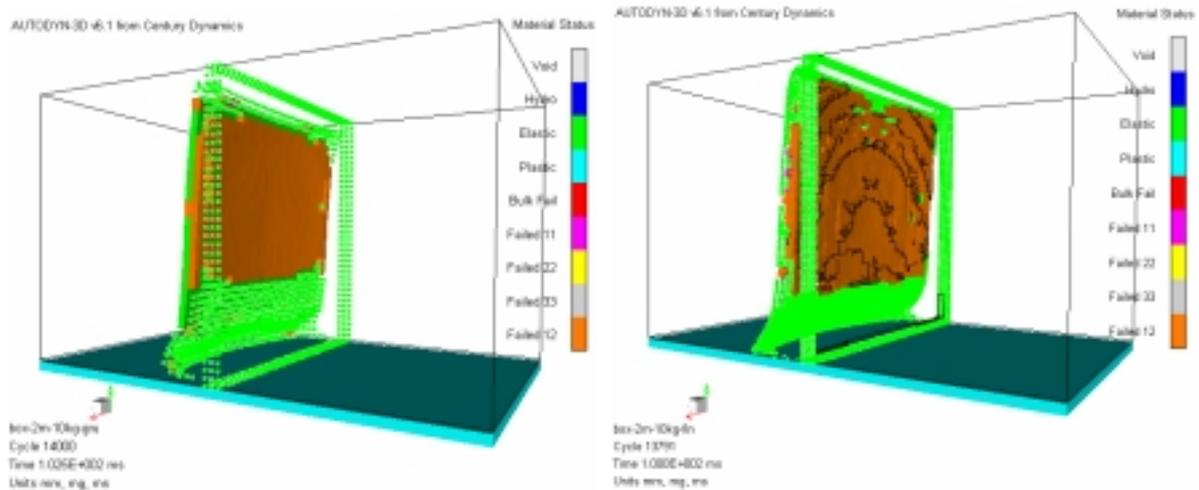


Figura 7: Perspectivas de modelos homogéneos para 10 kg de TNT a 2m de distancia con malla gruesa y fina

Los puntos de color rojo en la figura 5 y los de color verde en la figura 6 representan nodos erosionados. Como puede observarse, cualitativamente los modelos se comportan de forma similar en cuanto al desplazamiento respecto a la posición inicial.

Para definir un parámetro más preciso en la determinación del daño se toma como parámetro de medida el trabajo plástico acumulado en el muro que tiene relación directa con la energía disipada por deformación plástica. Sin embargo debe tenerse en cuenta que dicho trabajo no considera la parte erosionada del muro por lo que no es un parámetro objetivo para la medición del daño.

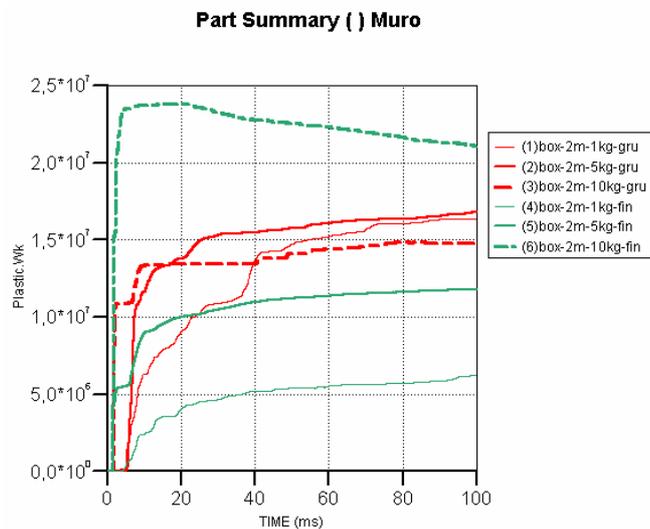


Figura 8: Trabajo plástico para modelo homogéneo

Al comparar las curvas de trabajo plástico para las distintas cargas se observa que el trabajo plástico disminuye a medida que la carga explosiva decrece lo cual indica un comportamiento correcto del modelo, sobretodo en el caso de malla fina. Sin embargo esta tendencia no se mantiene cuando se incrementa la distancia a la carga explosiva debido a que esta medida energética no incluye la deformación inelástica de los nodos erosionados. Es por ello que el trabajo plástico no puede ser utilizado como medida global del daño del muro.

A fin de tener una estimación del costo computacional en cada caso se detallan a

continuación los minutos necesarios de cómputo hasta para alcanzar 100 ms en el proceso de propagación de la onda explosiva.

| Masa de TNT | Modelo Homogéneo | | Modelo Fragmentado | |
|--------------|------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | Malla fina | Malla gruesa | Malla fina | Malla gruesa |
| 10 kg | 400 | 70 | 450 | 85 |
| 5 kg | 305 | 70 | 325 | 85 |
| 1 kg | 280 | 80 | 335 | 75 |

Tabla 7: Tiempos de cómputo en minutos para distintos modelos y niveles de discretización

El tiempo promedio necesario para procesar los modelos con malla fina es 4,5 veces mayor al tiempo promedio para malla gruesa.

Los tiempos promedios necesarios para los modelos fragmentados superan en un 13% a los tiempos para modelos homogéneos.

4 RESULTADOS

4.1 Comportamiento contra-intuitivo

Como se vio anteriormente, si se tiene en cuenta durante el proceso la fase negativa de la onda de presión (rarefacción) se observa en el muro un desplazamiento dirigido hacia la carga explosiva. En las figura 9 se muestran las posiciones de un muro de 30cm de espesor para distintos tiempos cuando no se desactiva el volumen de aire. El sentido de propagación de la onda explosiva es de derecha a izquierda en todos los casos. Se observa que hasta $t = 19\text{ms}$, el muro se desplaza alejándose de la carga, y luego comienza a acercarse. Este cambio en el desplazamiento es atribuible a la fase negativa de la onda de presión reflejada que llega a cambiar el signo del impulso reflejado sobre el muro.

La figura 10.a) muestra la onda de presión reflejada y el impulso para el modelo homogéneo de 10kg de TNT a 2m de distancia con malla gruesa. Se observa que los valores negativos de presión reflejada y la duración de la fase negativa son importantes y considerablemente mayores que los que pueden encontrarse en la bibliografía para presión incidente. Sin embargo, algunas curvas experimentales de variación de la presión reflejada en el tiempo como las presentadas por Alia y Souli (2005) en la figura 10.b) tienen aspectos similares.

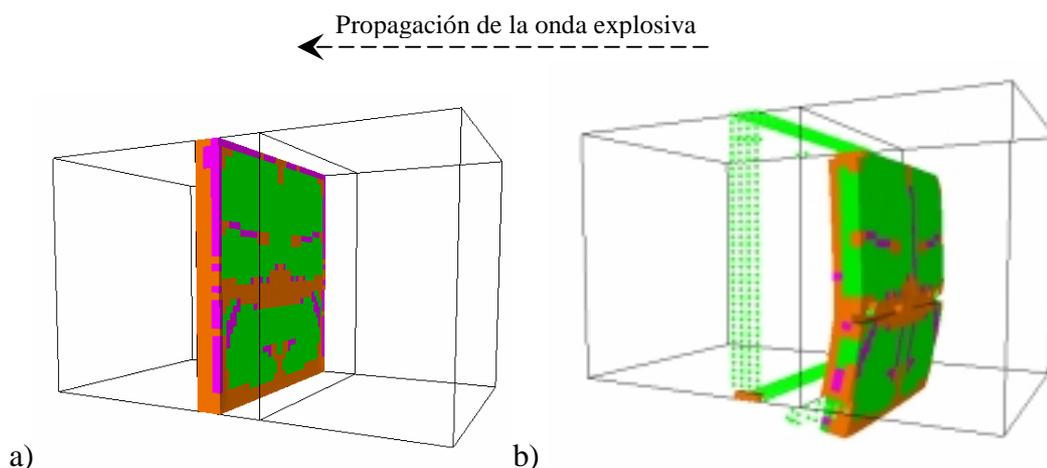


Figura 9: Posiciones del muro para distintos tiempos
 a) $t = 19\text{ms}$, muro alejándose de la carga b) Comportamiento contra-intuitivo

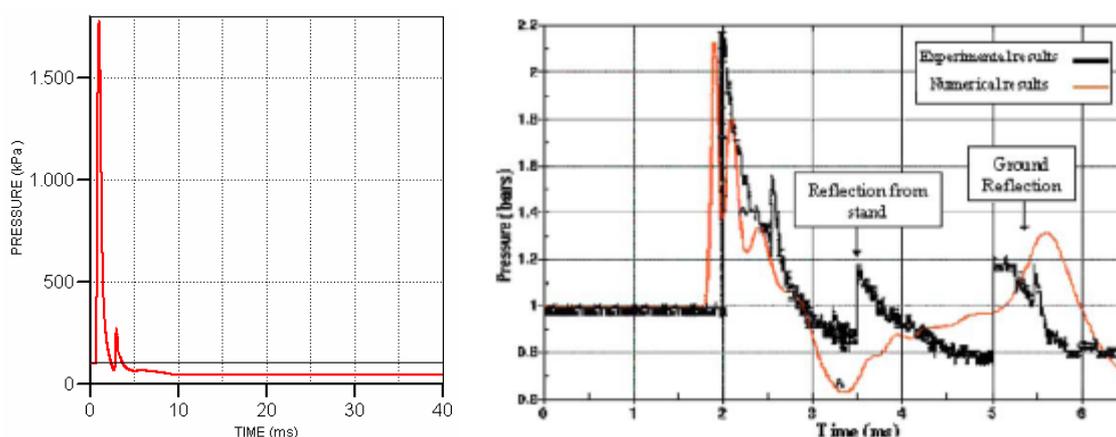


Figura 10: Historia de presión reflejada en el tiempo
 a) Modelo homogéneo de 10kg TNT a 2m de distancia con malla gruesa
 b) Presión medida en ensayo correspondiente a Alia y Souli (2005)

Este comportamiento contra-intuitivo se observa experimentalmente en ciertos casos y para determinadas condiciones (Galiev, 1996). En primer lugar el elemento estructural debe ser superficial o de espesor reducido. El tiempo de carga de la fase positiva no debe exceder significativamente a un cuarto del período fundamental de dicho elemento. La amplitud y forma de la onda explosiva, así como las características de interacción con la estructura y sus propiedades materiales tienen gran influencia en el comportamiento contra-intuitivo. En general las sobrepresiones p_s deben ser menores a 600 kPa. Dicho comportamiento puede resultar de una combinación de la recuperación elástica del material debida a la respuesta dinámica del mismo y la acción simultánea de la fase negativa de la onda de presión.

4.2 Análisis del nivel de daño

En este punto se obtienen valores cualitativos del daño en los muros a partir de la observación del modelo de rotura de los mismos. Se definen los siguientes niveles de daño:

- 1 Erosión en bordes y desprendimiento total del muro
- 2 Erosión en zona inferior. Fisuras circulares en cara posterior. Desprendimiento
- 3 Fisuración circular en cara frontal. Fisura horizontal y vertical en cara posterior. Desprendimiento.
- 4 Erosión en borde inferior. Fisuras en bordes laterales y fisura vertical en cara posterior.
- 5 Sin erosión. Bordes figurados. Fisura vertical y horizontal en ambas caras

Se reproduce el comportamiento del muro ya descrito con zonificación homogénea y discretización fina bajo cargas explosivas de distinta masa ubicadas a distintas distancias. La Tabla 8 ilustra casos típicos de los distintos niveles de daño definidos.

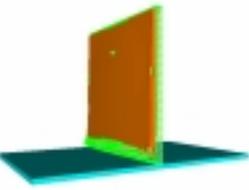
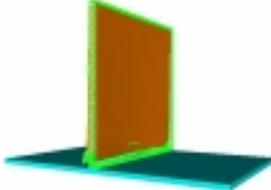
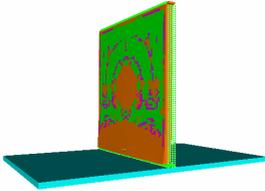
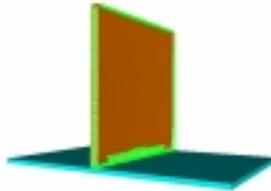
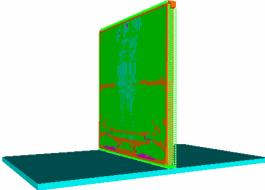
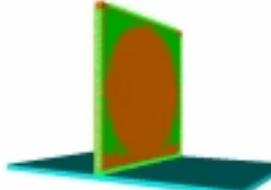
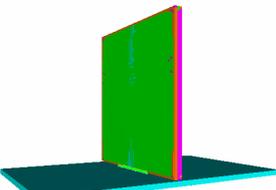
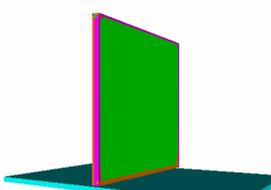
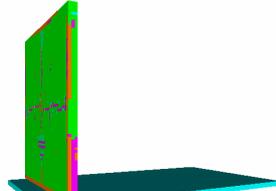
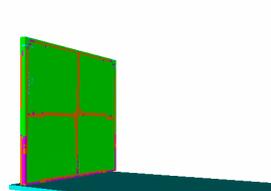
| Nivel de daño | Cara posterior | Frente |
|---------------|---|--|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |

Tabla 8: Niveles de daño

En la Tabla 9 se resumen los casos analizados y se asigna el nivel de daño correspondiente a cada uno de ellos.

| Caso | W [kg TNT] | R [m] | Z [m/kgTNT^{1/3}] | Modo de falla |
|-------------|-----------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 100 | 2 | 0,43 | 1 |
| 2 | 10 | 2 | 0,93 | 2 |
| 3 | 5 | 2 | 1,17 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| 5 | 1 | 3 | 3 | 5 |
| 6 | 1 | 4 | 4 | 5 |

Tabla 9: Niveles de daño para los distintos modelos.

5 CONCLUSIONES

La utilización de los modelos de malla fina presenta menores diferencias en los valores de presión respecto de valores analíticos. Las diferencias son mucho menores para las presiones incidentes (en un orden del 7%) que para las presiones reflejadas (del orden del 45%). Los tiempos en los cuales se producen los valores máximos o picos de presión prácticamente no varían con el grado de discretización.

Al dejar actuar la fase negativa de la onda, se observa un comportamiento contra-intuitivo del muro, el cual se desplaza hacia la ubicación de la carga explosiva. La amplitud y forma de la onda explosiva, así como las características de interacción con la estructura y sus propiedades materiales tienen gran influencia en dicho comportamiento.

Al comparar las curvas de trabajo plástico para las distintas cargas se observa que el trabajo plástico disminuye a medida que la carga explosiva decrece lo cual indica un comportamiento correcto del modelo. Sin embargo esta tendencia no se mantiene cuando se incrementa la distancia a la carga explosiva debido a que esta medida energética no incluye la deformación inelástica de los nodos erosionados. Es por ello que el trabajo plástico no puede ser utilizado como medida global del daño del muro.

El tiempo promedio necesario para procesar los modelos con malla fina es 4,5 veces mayor al tiempo promedio para malla gruesa.

Los tiempos promedios necesarios para los modelos fragmentados superan en un 13% a los tiempos para modelos homogéneos.

La extensión del análisis de daño realizado para un rango más grande de distancias escaladas y otras configuraciones de muro y materiales, permitiría definir diagramas de iso-daño como los que se encuentran en la bibliografía y que fueron obtenidos experimentalmente.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la Ing. Viviana Rougier por facilitar los parámetros experimentales de los materiales utilizados. Agradecen también al CONICET, al CIUNT por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo. El agradecimiento se extiende a Ching Yang Tham por el soporte técnico de AUTODYN.

REFERENCIAS

- Alia A. and Souli. M., *High explosive simulation using multi-material formulations*, Elsevier, France, 2005
- AUTODYN. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software, Version 6.1, User's Manual. Century Dynamics Inc., 2005
- Baker WE, Cox PA, Westine PS, Kulesz JJ and Strehlow RA. *Explosion hazards and evaluation*, Elsevier, Amsterdam, 1983.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), Risk management series. *Primer to design safe school projects in case of terrorist attacks*. USA. 2003.
- Galiev U. *Experimental observations and discusion of counterintuitive behavior of plates and shallow shells subjected to blast loading*. Pergamon, UK, 1996.
- Kinney GF, Graham KJ. *Explosive shocks in air. 2nd ed*. Berlin: Springer Verlag; 1985
- Luccioni, B. M., Ambrosini D. and Danesi, R. Blast load assessment using Hydrocodes. *Engineering Structures*, 28(12):1736-1744, 2006.
- Rougier V.C. and Luccioni B.M. *Análisis experimental del comportamiento de muros de mampostería reforzados con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras de carbono*. XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Mar del Plata, Argentina, 2006
- Smith PD. and Hetherington JG. *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, UK, 1994.